基于 FPGA 步进电机细分控制系统

王天放[1,2]，贾 楠[1]，彭如意[1,2]，吕建工[1]，彭吉龙[1]，付利平[1]
(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190；2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要：现代卫星载荷的探测功能日益强大，电机等活动部件在卫星载荷上的应用也日渐广泛。星上电机寿命和可靠性是制约卫星长期在轨正常工作的主要因素之一，因此星上电机系统设计在满足使用要求的同时，还需充分考虑到寿命和可靠性要求。本文设计了一种基于 FPGA 的二相混合式步进电机控制系统，采用细分控制方法，提高控制精度，抑制低频振动。除此之外设计加速过程，保证电机可靠启动；采用大电流停止，保证电机迅速停止；静止时使用小电流保持。通过系统测试证明，该系统具有功耗低、起停稳定等优点。

关键词：步进电机；细分控制；FPGA；PWM
中图分类号：TM384；TN709；TN492 文献标识码：A 文章编号：1674-6236(2016)01-0121-03

Stepper motor subdivision control system based on FPGA

WANG Tian-fang[1,2], JIA Nan[1], PENG Ru-yi[1,2], LV Jian-gong[1], PENG Ji-long[1], FU Li-ping[1]
(1. *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The capability of the modern payloads on satellite is getting stronger and stronger, and the motor has been used widely. The life and reliability of the motor equipped on satellite would be the main characters that restrict long-time work of the satellites. So the design of motor system on satellites should be not only satisfied with the application requirements, but also the requirements of life and reliability should be fully taken into account simultaneously. In this paper, a two-phase hybrid stepper motor control system based on FPGA is introduced. In order to improve control accuracy and suppress low-frequency vibration, the system was designed based on subdivision control method and an acceleration process was designed to ensure that motor started properly. Large current was used to stop the motor quickly and small current was used to keep the motor motionless. The test results showed that this system has the advantages of low-power consumption, starting and stopping steadily.

Key words: stepping motor; subdivision control; FPGA; PWM
DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2016.01.035

随着现代卫星载荷探测功能日益增强，对电机等活动部件的寿命与可靠性提出更高要求。步进电机自身具有体积小、质量轻、易于控制、误差不积累、可靠性高等优点，适合充当星上载荷活动部件。本文中使用一款两相混合式步进电机，该电机步距角为 1.8°。为进一步提高电机综合性能，通常使用一些控制方法控制电机运行，步进电机细分控制是一种上世纪 70 年代发展起来的电机控制技术，可显著改善步进电机综合性能，提高控制精度，抑制低频振荡，充分发挥步进电机作为优良开环组件的优势。

文中设计了一种基于 FPGA 的二相混合式步进电机控制系统，使用 LMD18200 作为桥式驱动芯片，SG1525 作为脉宽调制芯片，采用 8 细分方式。测试证明该系统具有功耗低、起停稳定等优点。

1 细分控制理论简介

细分步进驱动是将全步进驱动时的步距角的各相的电流以阶梯状 n 步逐渐增加[1]，由于电磁力矩与电流相关，通过减小绕组电流突变，就能减小电磁力矩突变。细分技术使步进电机步距细分，分辨率提高，振动、噪声和转矩波动问题得到很大改善，运转更为平稳[2]。获取细分阶梯波形一般采用电流矢量横幅均匀旋转法，对于二相混合型步进电机，为得到细分控制效果，控制两相绕组电流大小，使其矢量叠加后幅值基本保持恒定。

本文采用二相步进电机八细分控制，即在整步运行的每两个阶段中插入 7 个中间状态，从而将一个步距角分成 8 步[3]。具体表现为两相绕组中通过相差 90°相位的两相正弦波形的绕组电流[4]。参考电平与方向信号如图 1 所示，其中参考电平与绕组中电流波形对应，方向信号与绕组电流流向对

收稿日期：2015-03-06 稿件编号：201503085
作者简介：王天放(1989—)，男，河北沧州人，硕士研究生。研究方向：空间探测技术电子学方向，包括光电探测器件应用研究、微电机驱动控制方法研究、FPGA 和单片机开发等。

应，二者结合，就能得到两相相位相差 90°的正弦波形。对于 7 个中间状态参考电平的选择，应满足正弦函数，保证电流矢量叠加后幅值恒定。

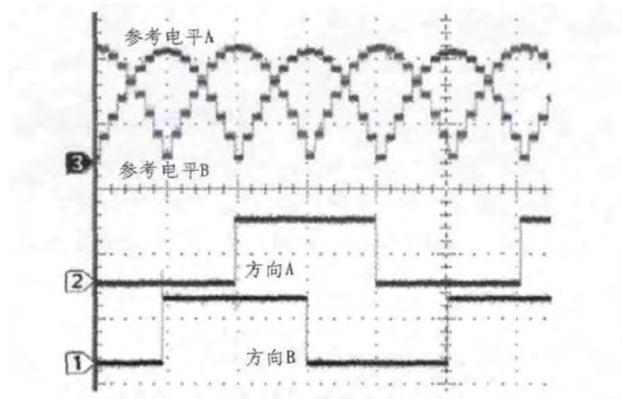


图 1　两相参考电平与方向信号

Fig. 1　The reference levels and signals of direction of two phases

2　步进电机驱动电路设计

目前步进电机驱动电路主要采用集成全桥驱动芯片。文中选用的全桥集成驱动芯片 LMD18200，该芯片具备完善的逻辑控制功能和芯片保护功能，工作电压高达 55 V，峰值输出电流高达 6A[5]，只需方向信号与 PWM（Pulse Width Modulation）信号，就可以控制芯片内部 DMOS 管通断，从而改变电机每相电流大小和方向。

2.1　PWM 信号发生

PWM 是脉冲宽度调制的简称，是一种将占空比变化的数字信号转换成模拟量的技术。步进电机作为感性负载，PWM 信号通过控制开关管通断，进而控制步进电机电流连续变化，因此只要提供占空比变化的 PWM 信号，就能实现电流细分变化。具体情况见图 2，当 PWM 信号处于 t_{on} 时，开关管导通，电流持续上升；当信号处于 t_{off} 时，开关管关闭，电流下降。当固定占空比的 PWM 信号持续较长时间，电流在某一固定值附近波动。

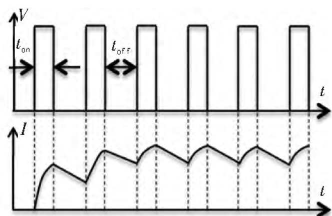


图 2　PWM 信号与电流关系

Fig. 2　The relationship between PWM signal and current

PWM 信号产生方法主要有软件和硬件两种，两种方法各有优缺点。软件产生 PWM 信号可采用 SPWM 法（正弦函数脉宽调制法，此方法也可以通过硬件电路实现），即使用固定频率的三角波形与正弦波形的交点作为 PWM 信号的导通点或截止点。如图 3 所示，三角波形与阶梯波形较，当三角波形电压高于阶梯波形电压时，输出低电平，否则输出高电平，这样得到 PWM 信号。如果使用细分控制方法，就用细分阶梯波形代替正弦波形。软件直接产生 PWM 信号，电路较简单，但程序相对复杂，同时也不利于长线传输（长线传输造成波形畸变，占空比不稳定）。

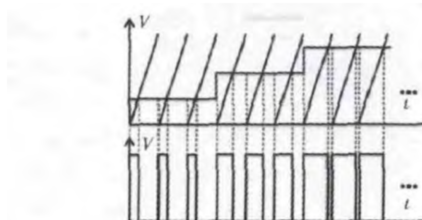


图 3　SPWM 正弦函数脉宽调制法示意图

Fig. 3　Schematic diagram of SPWM

硬件产生 PWM 信号通常使用集成 PWM 控制芯片作为波形发生器。该方法虽然需要更多元件，但软件程序简单，适宜长线传输，能更好保证系统可靠性。本文选用 SG1525 集成脉宽调制控制芯片产生 PWM 波形，该芯片内含欠压锁定电路、软启动控制电路、PWM 锁存器，有过流保护功能，频率可调，同时能限制最大占空比[6]。对于 SG1525 芯片，电平由正输入端输入，输出引脚与负输入端相连，形成反馈，这样输入电平高低决定了输出 PWM 波形的占空比，同时电容与电阻值选取决定 PWM 波形频率。SG1525 输入电平由串行 DA——TLV5638 给出，输入参考电平与 SG1525 输出占空比之间的关系如图 4 所示。

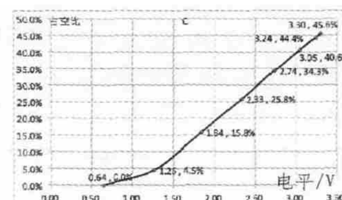


图 4　SG1525 输入电压与占空比关系

Fig. 4　The relationship between input voltage and duty ratio of SG1525

2.2　硬件电路设计

根据以上描述设计硬件电路，设计框图见图 5。根据设计需求，FPGA 控制板与步进电机驱动板分开。FPGA 输出控制信号通过 OC 门驱动器，经电缆进入电机驱动板，再经过缓冲器对波形整形，驱动串行 DA（TLV5638）与集成电机驱动器（LMD18200），串行 DA 为 PWM 发生器（SG1525）提供细分参考电平，最终由集成电机驱动器产生两相驱动电流，使电机转动。位置传感器获取位置信号，由 FPGA 采集，作为控制电机起停的依据。

3　FPGA 电机驱动程序设计

FPGA 程序提供电机驱动信号，其中包括直接为 LMD18200 提供两路方向信号，为串行 DA 提供片选、分频时钟及数据信号，通过串行 DA 后转换成参考电平。为实现步进电机细分控制，参考电平以细分阶梯波形式给出，如图 1 所示为两相八细分参考电平与方向信号。

步进电机在启动时有启动频率限制，当实际频率大于启

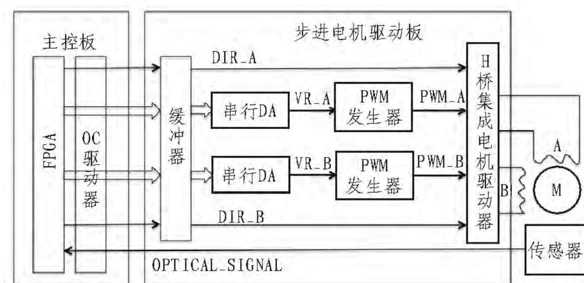


图 5　硬件设计框图

Fig. 5　Block diagram of hardware design

动频率时，电机不能成功启动，造成堵转，因此软件设计必须保证初始频率小于启动频率，因此包含加速过程，逐步达到正常转速。步进电机接收到位置传感器信号后停止，这里没有采用减速曲线的方案，直接使用较大电流持续一段时间，使电机静止。静止时，电机绕组上通较小电流，保持电机静止不晃动。

电机驱动软件使用 VHDL 硬件编程语言编写，主要分为 DETECT、CONTORL 和 DRIVE 3 个模块（模块划分及接口见图 6）。当外部驱动指令发出，由 CONTROL 模块负责接收，并根据当前位置，分配驱动方式，并发送信号 FIND 启动电机。模块 DRIVE 接收到启动信号，进入加速状态，当加速到正常运行频率，保持速度不变。同时 DETECT 模块实时监测位置传感器信号，当到达指定位置，向 CONTROL 模块发送信号 EDGE，随后 CONTROL 模块发送信号 FIND，使 DRIVE 跳转到刹车状态。过一段时间，DRIVE 模块进入电流保持状态，并向 CONTROL 模块反馈 STOP 信号，CONTROL 模块对外发送当前位置信息 LOCATION，并等待下一驱动指令。

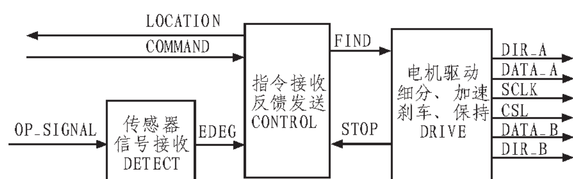


图 6　软件模块与接口设计

Fig. 6　Software module and design of interface

4　系统测试

针对该步进电机控制系统的测试主要包括运行电流测试与电机停止稳定性测试。

运行电流测试使用示波器探头监测 LMD18200 电流管脚，获得绕组电流。此外在绕组中串联 1 欧姆电阻，测量该 1 欧姆电阻两端电压，求差获取电阻两端电压差值。测试得到波形如图 7 所示。

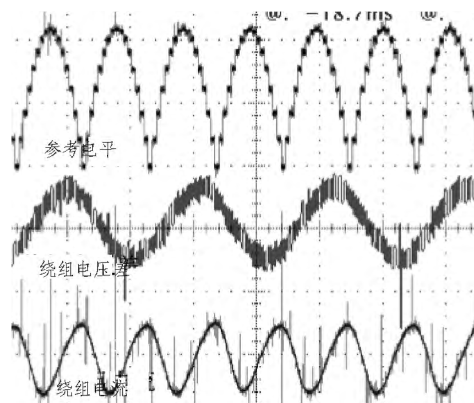


图 7　电机运行电流测试

Fig. 7　Current test when motor is running properly

电机停止状况测试使用 16 位光电编码器作为角度传感器，通过联轴器将步进电机与光电编码器连接，步进电机转动带动编码器转动，测量角度。角度值通过串口发送到计算机，解码得到角度值。通过实际测得电机刚停止时角度与时间关系，可知由于没有采用减速曲线，而使用增大电流的方式使电机停止，晃动不可避免，但电机在 40 毫秒内恢复稳定。

5　结束语

文中采用步进电机细分控制方法，设计了一种基于 FPGA 二相混合式步进电机控制系统，并通过测试对其运行电流与停止状态进行验证。该设计简单可靠，能实现加速启动，能在任意位置稳定起停，且功耗较低，适用于星载步进电机驱动。

参考文献：

[1] 坂本正文.步进电机应用技术[M]. 北京:科学出版社，2010.
[2] 谭建成. 电机控制专用集成电路[M]. 北京:机械工业出版社，1997.
[3] 史敬灼. 步进电动机伺服控制技术[M]. 北京:科学出版社，2006.
[4] 桑鹏，吕建工，彭吉龙，等. 步进电机变速控制系统设计[J]. 电子设计工程，2013(22):155-158.
[5] 张军，葛悦，刘超. 一种高效的两相步进电机控制技术[J]. 计算机测量与控制，2012，20(8):2130-2132.
[6] 陶凯，赖康生. 基于PWM控制H桥驱动半导体制冷片的恒温系统[J]. 工业控制计算机，2013，26(4):131-133.